

# ダイナミックプロセス制御シミュレータによる板厚・伸び率 制御精度向上

## Improvement of Accuracy for Gauge and Elongation Control by Dynamic-Process-Control-Simulator

上之俊昭<sup>\*(1)</sup>  
Toshiaki UENO

空尾謙嗣<sup>\*(2)</sup>  
Kenji SORAO

### 抄 録

新日本製鐵では、プロセス制御ソリューションの一環として、実プラントの動特性を再現するダイナミックプロセス制御シミュレータを開発し制御系解析診断や新制御手法の検討を行っている。この内、タンデム冷間圧延ミル用板厚制御シミュレータをシングル冷間圧延ミル用板厚制御、スキンパスミル用伸び率制御に拡張し、新日本製鐵社内の様々なタイプのミルに対する寸法制御の検討を可能にした。特に連続溶融亜鉛めっきラインにおいて伸び率制御シミュレータを用いた新制御の考案により、炉出側ミルにおいて溶接点が高速に通過する際に発生していた伸び率不合を大幅に低減することができた。

### Abstract

We have developed many dynamic-process-control-simulators with dynamic-properties as same as the real plant for a part of process-control-solution. And by these simulators, we have been able to diagnose the control and examine the improved control method. For example, we have made the simulators of auto-gauge-control for single cold strip mill and elongation-control for skin pass mill based on our simulator for tandem cold strip mill, and we have been able to examine the size-control for various mill types. Especially for continuous galvanizing line, with the control method improved by using the simulator of elongation control, we could have much improved the yield of elongation in front and behind of welding point at high speed of mill in the delivery section of furnace.

## 1. 緒 言

新日本製鐵では、プロセス制御ソリューションの一環として、実プラントの動特性を再現するダイナミックプロセス制御シミュレータを開発し、制御系のデータ収集・解析、診断・新制御手法の検討までを一貫して行っている(図1参照)。

この内、板厚制御に関しては、新日本製鐵八幡製鐵所新冷延工場建設時に新板厚制御(以下、AGC)検討のために開発したタンデム冷間圧延ミル用AGCシミュレータを、その後、シングル冷間圧延ミル用AGC、スキンパスミル用伸び率制御(以下、AEC)に拡張を図り、新日本製鐵社内の様々なタイプのミルに対する寸法制御(板厚、伸び率)の検討を可能にした。

特に、従来手作業により試行錯誤によって求めていたシミュレータパラメータの自動同定技術を開発し、シミュレータの高精度化および構築の効率化を実現した。本自動同定技術は非線形最小二乗法

を使用し、材料の摩擦係数および既設AGCコントローラ定数、等のシミュレータパラメータを自動同定するものである(図2参照)。この内、既設AGCコントローラ定数の同定に関しては、特に既設老朽設備に多いアナログ制御系において、従来はオンラインにて多点測定することによる手間や制御系へのノイズ重量の観点からコントローラ定数の同定が困難であった。しかし、本技術により、コントローラ定数を最小の測定点で且つ自動同定することが可能になった。その結果、実板厚とほぼ等しいシミュレータ板厚が得られ、既設制御系の診断、改善策検討を効率的に行うことが可能となった(図3参照)。

又、本シミュレータを活用することで、寸法制御の新技術開発も実現している。以後では、その一例として連続溶融亜鉛めっき鋼板ライン(以下、CGL)におけるスキンパスミルの新AECの開発について紹介する。

<sup>\*(1)</sup> 環境・プロセス研究開発センター システム制御技術部 マネジャー  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2472

<sup>\*(2)</sup> ㈱日鉄エレックス 鉄鋼エンジニアリング部

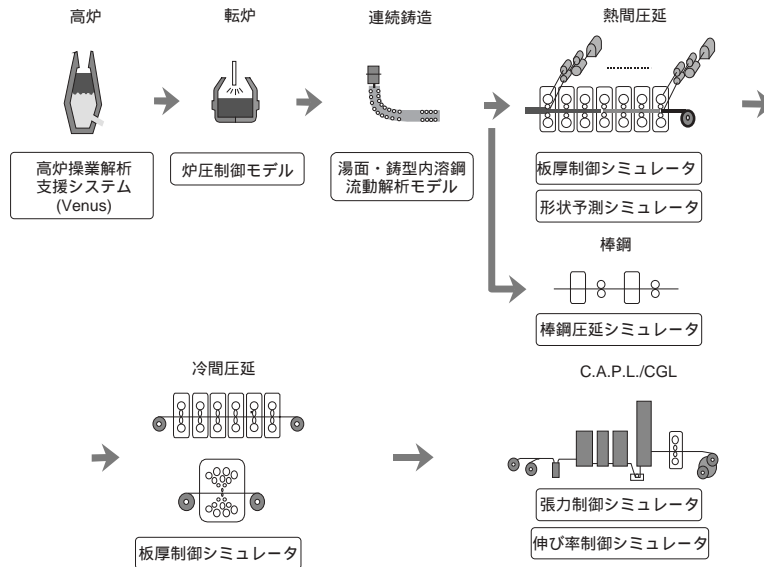


図1 ダイナミックプロセス制御シミュレータマップ

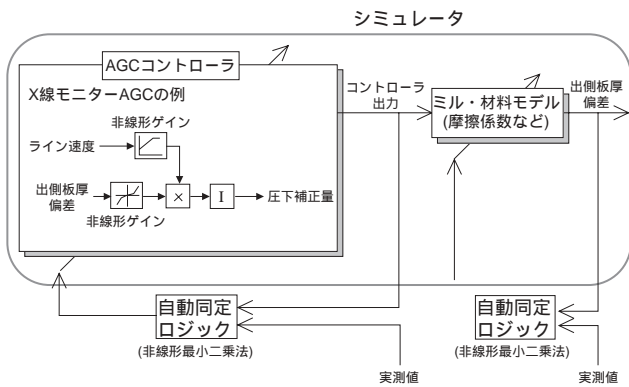
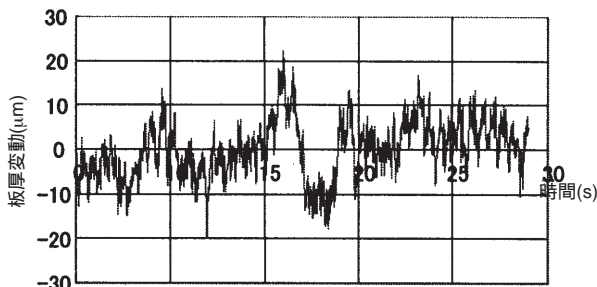
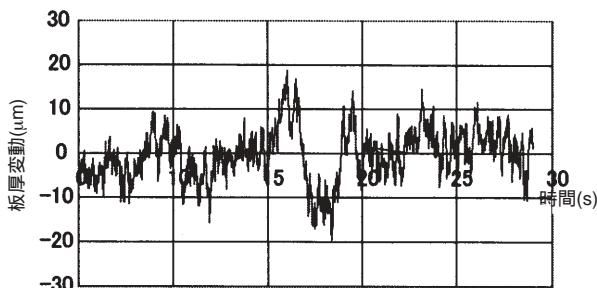


図2 シミュレータパラメータ自動同定



(a)実板厚変動



(b)シミュレーション

図3 シングル冷間圧延ミル板厚の例 (試運転転圧延を模擬)

## 2. AECシミュレータを用いた新AEC技術の開発

### 2.1 はじめに

連続プロセスラインに設置されるスキンパスミルでは、品質の向上、生産性向上の観点からAECの高精度化が要求されている。

本報では、特にCGLのスキンパスミル設備におけるAECに関して、通板材変更等の設定替え直後に発生する伸び率不都合を短縮化する手法について報告する。本手法を適用することにより、CGL設備において、歩留りの向上による生産性の向上化が実現可能となる。

また、当該手法の実機化においては、高精度スキンパスミルシミュレータを活用することで、実機適用時において各種誤差や外乱に起因して生じる制御性能の低下をオフラインにて定量的に評価し、それに基づいて制御ロジックの改良を行なった。その結果、実機での制御系調整時間の大幅短縮を実現しつつ、想定通りのパフォーマンスを実機においても実現することに成功した。本報では、当該スキンパスミルダイナミックシミュレータについても合わせて報告する。

### 2.2 連続プロセスラインにおけるスキンパスミル設備

本報にて想定する、CGLを含む連続プロセスラインにおけるスキンパスミル設備の構成例を図4に示す。ここで、速度主幹制御系については、前後のプライドルロールはそれぞれ独立な電動機での速度制御により、所望の張力値に制御される。また、圧下制御系に関しては、油圧圧下制御装置にて圧延力制御をすることで、所望の伸

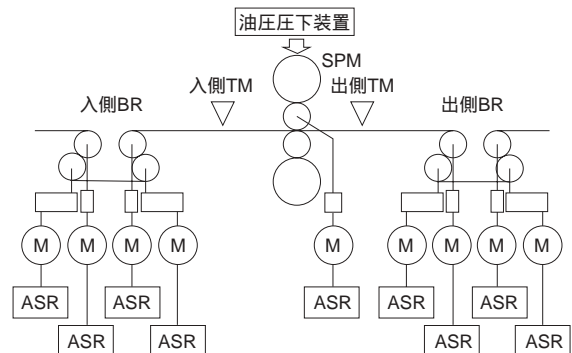


図4 インラインスキンパスミル設備構成

び率を実現させる。

### 2.3 連続プロセスラインスキンプスミルのAEC

#### 2.3.1 従来のAEC方式とその問題点

一般にCGL設備では、スキンプスミルが中央セクション(炉セクション)に設置されている関係上、溶接点通過時にライン速度を操作することが難しいため、溶接点通過での設定変更時のAECに関して、以下のような手法が用いられている。

ワークロールへの疵入り防止のため、溶接点がスキンプスミル部を通過する際は予め軽圧下にしておく。

何らかの方法で計算された最適圧延荷重値をあらかじめ初期プリセット荷重値として設定。

鋼鉄の溶接点がスキンプスミル部を通過した後、当該プリセット荷重値を実現するまで油圧圧下装置で圧延機の圧延荷重値を操作し、

圧延荷重実績が初期プリセット荷重値に到達した後、伸び率実績のフィードバック値を用いて、油圧圧下装置により圧下量を操作することで、所望の伸び率を達成させる。

ここで、上記制御手法におけるの段階では、プリセットされた圧延荷重値を達成するまで、圧下量を比較的高速で操作するため、その際の伸び率は速やかに変化し、プリセットされた圧延荷重値と所望の伸び率を実現するために必要な圧延荷重値との間に誤差が全く無ければ、AEC開始から最短時間で所望の伸び率を実現することができる。そこで、プリセット荷重値の高精度化を目指して、従来からオフライン学習や荷重モデルの高機能化等が検討されてきた。

しかしながら、そのような手法に基づいてプリセットされた最適圧延荷重値と、実際に所望の伸び率を実現できる圧延荷重値との間にも、炉での焼鈍状況や材料特性のばらつき、ワークロール粗度の変化等、さまざまな条件によって多少の誤差が生じ、結果としてプリセット荷重値まで圧下したとしても、目標伸び率に対してある程度の偏差が生じる。上記した従来の手法では、この初期プリセット荷重値達成時に発生した伸び率偏差分を、圧下制御系にフィードバックし、圧延力を操作する伸び率フィードバック制御を行うことで解決しているが、この場合、上記誤差が大きいと、それに伴って伸び率不具合期間が長くなり、製品の歩留まりの点で問題が生じる。

#### 2.3.2 スキンプスミルダイナミックセットアップ

一方、本報にて報告する手法(スキンプスミルダイナミックセットアップ)は、インラインスキンプスミルのAECにおいて、設定変更時のプリセット荷重値に誤差が大きく、その結果プリセット荷重確立時に所望の伸び率が実現できなかった場合、当該締め込み時の圧延情報より、最適なプリセット荷重を実時間で補正することで所望の伸び率を実現するための最適荷重を早期に達成させ、伸び率不具合長を大幅に低減し、圧延材の歩留りを向上可能とするものである。

提案するスキンプスミルダイナミックセットアップについて、具体的な補正方法および、補正量の算出方法を以下に述べる。

いま、入側板厚 $H_1$ 、入側速度 $V_1$ で出側速度が設定伸び率 $e^{ref}$ を実現する $V_2^{ref}$ だった時の出側板厚を目標出側板厚 $H_2^{ref}$ とすると、マスフロー一定則より以下の条件が成立する。

$$\begin{aligned} H_1 V_1 &= H_2^{ref} V_2^{ref} \\ \therefore H_2^{ref} &= \frac{H_1 V_1}{V_2^{ref}} \end{aligned} \quad (1)$$

また、 $V_2^{ref}$ は、設定伸び率 $e^{ref}$ を用いて、

$$\begin{aligned} e^{ref} &= \frac{V_2^{ref} - V_1}{V_1} \\ \therefore V_2^{ref} &= V_1(e^{ref} + 1) \end{aligned} \quad (2)$$

と表すことができるので、(1)、(2)式より、目標出側板厚 $H_2^{ref}$ は(3)式のように表現できる。

$$H_2^{ref} = \frac{H_1}{e^{ref} + 1} \quad (3)$$

いま、伸び率実績が $\alpha$ 目標伸び率との偏差が $e$ だったとき、出側速度 $V_2$ を、以下のように目標出側板速 $V_2^{ref}$ とそれとの偏差 $V$ を用いて、

$$V_2 = V_2^{ref} - \Delta V_2 \quad (4)$$

と表すと、伸び率実績 $e$ に関して、

$$\begin{aligned} e &= \frac{V_2 - V_1}{V_1} \\ &= \frac{V_2^{ref} - V_1}{V_1} - \frac{\Delta V_2}{V_1} = e^{ref} - \Delta e \end{aligned} \quad (5)$$

が成立するので、出側板速度 $V_2$ は伸び率偏差 $e$ を用いて(6)式のようにあらわすことができる。

$$V_2 = V_2^{ref} - \Delta e V_1 \quad (6)$$

ここで、その時の出側板厚 $H_2$ は、マスフロー一定則より、

$$H_1 V_1 = H_2 V_2 \quad (7)$$

が成立するので、(2)、(6)、(7)式より、出側板厚 $H_2$ は

$$H_2 = \frac{H_1}{e^{ref} - \Delta e + 1} = \frac{H_1}{e + 1} \quad (8)$$

と表すことができるので、伸び率偏差 $e$ の時の出側板厚偏差 $H_2$ は、

$$\begin{aligned} \Delta H_2 &= H_2^{ref} - H_2 \\ &= \left( \frac{1}{e^{ref} + 1} - \frac{1}{e + 1} \right) \cdot H_1 \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

いま、このミル直下の出側板厚偏差 $H_2$ を、 $S$ だけ圧下してとることを考えると、ミル定数を $M$ 、塑性係数を $Q$ として、

$$\Delta H_2 = -\frac{M}{M+Q} \Delta S \quad (10)$$

であればよいので、(9)、(10)式より、

$$\Delta S = -\frac{M+Q}{M} \left( \frac{1}{e^{ref} + 1} - \frac{1}{e + 1} \right) H_1 \quad (11)$$

だけ圧下すればよいことになる。

さらに、(11)式で定義される $S$ だけ圧下した時の荷重変動 $P$ は、

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{MQ}{M+Q} (-\Delta S) \\ &= Q \cdot H_1 \cdot \left( \frac{1}{e^{ref} + 1} - \frac{1}{e + 1} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

で得られ、伸び率偏差 $e$ を解消するための必要圧延荷重は、最終的に(12)式で与えられる値となる。つまり、当初のセットアップ荷重確立の時点でその時の伸び率誤差を測定し、(12)式で算出される荷重 $P$ をセットアップ荷重補正量 $P_{adj}$ としてプリセット荷重に加えることで得られる荷重を、新しいプリセット荷重として再設定することで、フィードバック制御に比べてより速やかに所望の伸び率

を確保できることになる。

一方、(12)式を用いるためには、塑性係数 $Q$ および、設定値からのオフゲージを考慮して、入側板厚 $H_1$ を推定する必要があるが、上記同様の考え方より、それぞれ次式にて推定することができる。

$$Q = \frac{P_b - P_a}{\frac{1}{M}(P_b - P_a) + (S_b - S_a)} \quad (13)$$

$$H_1 = H_{1a} = \frac{P_b - P_a}{Q \left( \frac{1}{e_b + 1} - \frac{1}{e_a + 1} \right)} \quad (14)$$

ここで、 $P_a$ 、 $P_b$ 、 $e_a$ 、 $e_b$ はそれぞれ、圧下位置が $S_a$ 、 $S_b$ であったときの荷重および、伸び率実績である。

#### 2.4 高精度スキンパスミルシミュレータによるオフライン検証

前述のように新日本製鐵は鉄鋼プロセス制御に関する様々なシミュレータを保有しており、需要家からの品質向上の要求に対して、当該シミュレータを有効活用することで、効率的かつ確実な制御精度向上化等のソリューションを展開している。当該手法の実機適用にあたっては、スキンパスミルダイナミックシミュレータによる事前のオフライン検証を行なうことで、効率的かつ確実な機能確成を図った。

##### 2.4.1 高精度スキンパスミルダイナミックシミュレータ

ここで、簡単にシミュレータの概要について説明する。シミュレータは、図5に示すように、入側板厚情報、各種制御設定等を入力すると、出側板厚、伸び率、荷重、張力等各種実績が出力される構成となっており、制御対象のモデル部には、圧延理論や材料の断塑性特性および、アクチュエータの動特性、コントローラにおける離散時間動作等が忠実に組込まれている。また、摩擦係数や変形抵抗等に含まれる未知のパラメータについて、実データを用いた自動同定機能も装備している。

図6は、あるプロセスラインのスキンパスミルにおける試運転時の圧延実績データと、その圧延状況をシミュレータにより再現させた結果を示す。図より当該シミュレータが、非常に精度良く実圧延現象を再現可能であることが分かる。

##### 2.4.3 シミュレーション検討に基づいた制御ロジックの改良

前述のAECシミュレータにてダイナミックセットアップロジックの動作を検証したところ、ミル定数の軽圧下領域における非線型要素および、鋼板の実効平均変形抵抗のひずみ速度起因要素および張力変動による塑性係数 $Q$ の変動、センサノイズや制御装置の動作遅れ等の影響のため、条件によっては上記手法によるセットアップ荷

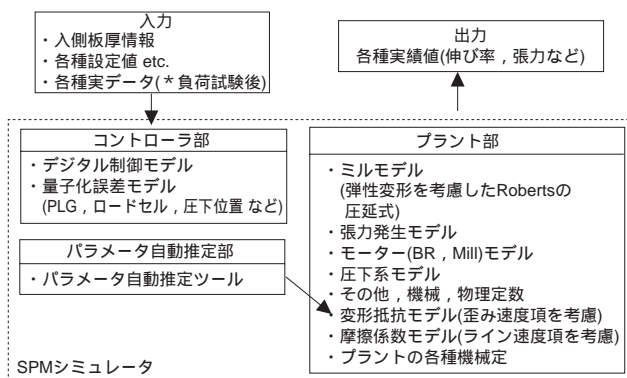


図5 ダイナミックスキンパスミルシミュレータ

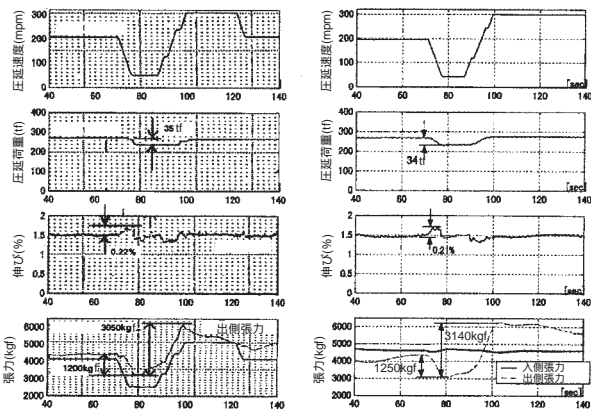


図6 ダイナミックスキンパスミルシミュレータの精度検証

重に誤差が発生する場合があることが判明した。そこで、実機への適用の際には当該誤差の影響を緩和して安定した動作を指向すべく、前節で得られた制御ロジックを、最終的には図7に示すフローのように修正を行なった。また、図中の制御パラメータについては、実現象を精度良く再現可能な当該シミュレータを活用することにより、実機でもそのままの値を使用することのできるため、オフラインにて最適チューニングを行なうことで、実機での制御系調整時間を大幅に短縮することが可能となる。

上記検討によって得られたダイナミックセットアップロジックに関するシミュレーション結果を図8に示す。シミュレーションは、30s時点において締め込みを開始する際に、所望の伸び率(1.0%)を実現するための最適圧延荷重345tfに対して、初期プリセット荷重の誤差が-30%(240tf)であった場合について、本手法使用時と不使用時の圧延荷重及び伸び率実績の応答を比較したものである。

シミュレーション結果より、本手法により、初期プリセット荷重に誤差があった場合も精度良く補正量が算出されることで、プリセット荷重値の誤差が0%であった場合とほぼ同様な圧延荷重の応答が実現され、結果として伸び率実績もオーバーシュートすることなく速やかに目標値に到達していることが分かる。

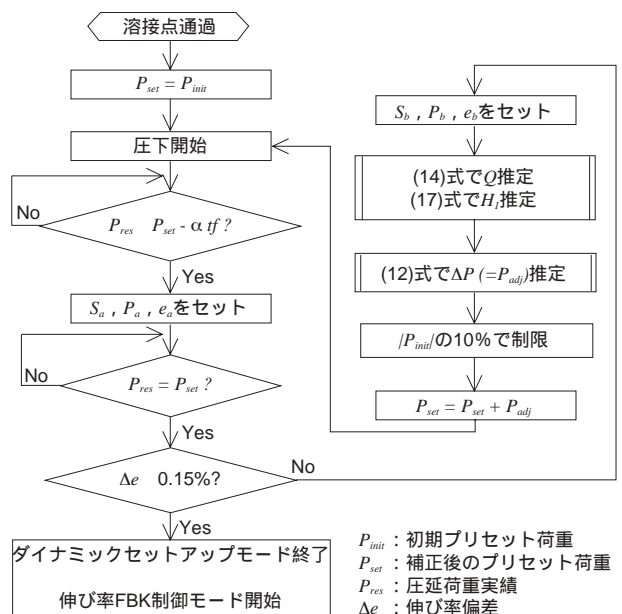
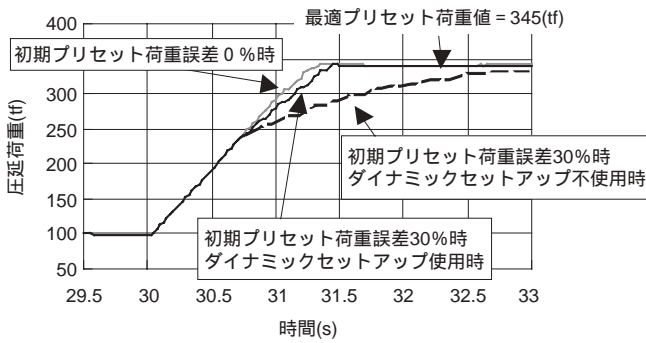
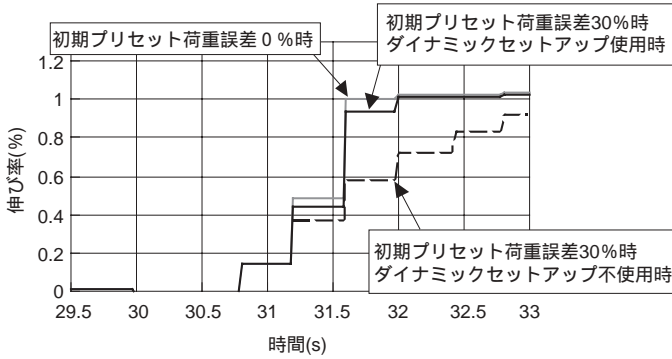


図7 スキンパスミルダイナミックセットアップロジック



(a) 圧延荷重



(b) 伸び率実績 (目標伸び率 = 1.0%)

図8 シミュレーションによる本手法の検証

## 2.5 実機適用結果

### 2.5.1 新制御手法のパフォーマンスについて

開発した伸び率制御手法を実機適用した例を図9に示す。本例では、1.015mm(板厚)×1618mm(板幅)材から、溶接点を挟んで1.008mm(板厚)×1707mm(板幅)材に材料および材質変更が発生す

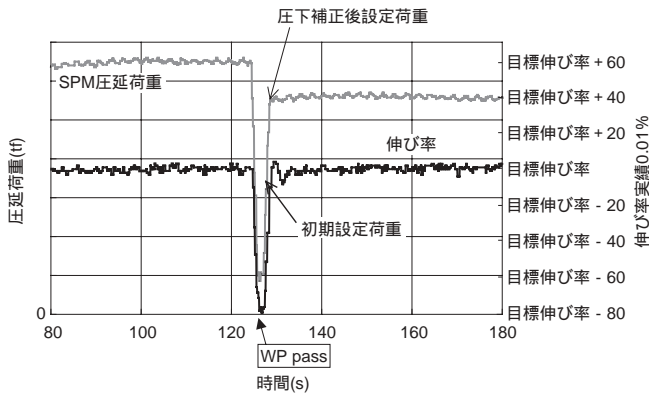


図9 実機AEC結果(1.02mm×1618mm 1.00mm×1707mmの設定変更時)

表1 本手法適用による伸び率不合長低減効果

	伸び率不合長
本手法使用時	2.6m
本手法不使用時	8.5m <sup>1)</sup>

\*1 シミュレータで当該条件を再現させた結果より推定

表2 実機試運転調整期間(制御ゲイン調整期間含む)

	調整期間
従来の調整方法	14日
シミュレータを活用した調整方法(本開発手法)	2日

る箇所において、所望の伸び率を確立するための最適荷重値に対して、プリセット荷重値の誤差が-40%であったケースである。前節のシミュレーション結果同様、開発した手法を用いることで、実時間で最適荷重まで荷重設定を補正し、速やかに伸び率実績が目標値に到達できていることが分かる。なお、当該溶接点通過時のライン速度は高速一定速度である。

また、前述のシミュレータに当該圧延状況を設定し、本手法を使わなかった場合をシミュレートしてその場合の伸び率不合長さを測定し、本手法を使用した実圧延と比較したところ表1のようになった。なお、伸び率不合部は、実績伸び率が目標値に対する偏差が±0.1%以上の箇所を指す。表より、本手法を用いることでプリセット荷重値に誤差が内在していた場合においても、溶接点通過時の伸び率不合長を大幅に削減し、歩留り向上が実現できていることが分かる。

### 2.5.2 試運転調整期間の短縮化実績

前述のように高精度シミュレータを用いた事前検討を十分に行なった結果、表2に示すように、実機での試運転調整期間を通常に比べ大幅に短縮させることに成功した。

## 2.6 おわりに

ダイナミックプロセス制御シミュレータを用いた新制御手法開発の一例として、連続溶融亜鉛めっき鋼板ライン(CGL)のスキンパスミル設備における新AECの開発について報告した。当該AEC手法を適用することで、通板材変更等の設定替え直後に発生する伸び率不合部を大幅に短縮化することが可能となる。また、制御手法の開発および実機適用にあたっては、高精度シミュレータを活用することで、制御機能確認から制御ゲインのファインチューニングを含めたオフライン検討が可能となり、短工期かつ高品質な開発作業を実現することができた。

なお、報告したAEC手法は、新日本製鐵CGL設備にて実用化され、現在順調に稼働しており、生産性向上に寄与している。